

Projet de technique d'optimisation

**Optimisation d'un éco-BAP (Béton autoplaçant) à base de
sédiment de dragage**



- **Réalisé par** : LAOUMRI Soufiane
- **Supervisé par** : Dr. EL MKHALET Mouna

Année universitaire : 2020/2021

SOMMAIRE :

I. Introduction.

1. Mise en contexte
2. Justification du choix

II. Problématique des sédiments dragués

1. Généralités sur les sédiments de dragage
2. Problématiques du dragage et de la gestion des sédiments

III. Généralités sur les bétons autoplaçants (BAPs)

1. Caractéristiques des BAP à l'état frais
2. Optimisation des sous-produits dans les BAPs

IV. Optimisation et valorisation d'un Eco-béton autoplaçant (eco-BAPs) à base de sédiments marins (de dragage)

1. Protocole expérimental
2. Résultats et discussion

V. Application au Maroc

1. Gouvernance du marché de sable au Maroc
2. Les projets d'optimisations vont avoir plus d'efficacité s'ils seront effectués par un bureau d'étude ou par une grande société ?
3. Des perspectives pour un élargissement de ce sujet

VI. Conclusion

VII. Références

I. Introduction :

1. Mise en contexte :

La demande de ressources naturelles a grandement augmenté au cours du dernier siècle surtout dans **le domaine du génie civil** puisque tout projet de construction ou de réhabilitation requiert l'utilisation de matériaux granulaires. Une partie de ces matériaux sert à la fabrication de ciment, qui est une préoccupation majeure de la communauté industrielle et scientifique. À lui seul, le processus de production de 1 tonne de ciment libère près de **0,6 à 1,4 tonne de CO₂** selon le procédé employé dans chaque pays. Ces matières naturelles constituent également une ressource limitée et non renouvelable dont l'exploitation est souvent raccourcie à des aires restreintes, face à une industrie intensive. Ainsi, le remplacement d'une partie du ciment par des sous-produits recyclés aura un impact économique et environnemental marqué. Dans une vision de développement durable et pour réduire l'appauvrissement des ressources naturelles et diminuer les émissions de CO₂, l'adoption de **l'économe circulaire** comme modèle de consommation est devenue une nécessité. Les sédiments de dragage pourraient constituer une alternative en devenant une nouvelle source de matériaux de construction. Habituellement, les sédiments non pollués sont immergés en mer ou traités par gestion à terre, une pratique qui s'éloigne de la vision de développement durable et d'économie circulaire. La considération des sédiments comme une richesse minérale recyclable limite l'usage de matériaux granulaires issus de l'extraction. Suivant leur origine, les sédiments contiennent une plus ou moins grande teneur en matières organiques, parfois en contaminants métalliques, et surtout en minéraux qui peuvent avoir une activité pouzzolanique. De fait, une caractérisation poussée est indispensable pour envisager un potentiel recyclage. Cette valorisation peut être très avantageuse surtout dans des matrices cimentaires comme les bétons autoplacants (BAPs) qui nécessitent un dosage élevé en éléments fins.

Les BAPs sont une génération de bétons conçus pour faciliter la mise en place du béton sans vibration, afin d'accélérer le rythme de construction et améliorer la qualité des structures. Ces bétons s'adaptent à un certain nombre d'applications du génie civil. Leur emploi continue à croître dans la construction, la préfabrication, et la réparation des infrastructures. Cependant, concilier fluidité, homogénéité, et stabiliser le coût de la production est un défi. En fait, la formulation des BAPs est coûteuse par rapport au béton ordinaire en raison de leur demande élevée en liants et en additifs chimiques. L'une des stratégies pour surmonter l'impact environnemental des BAPs, sans perturber le développement économique et social, est l'utilisation des sous-produits soit en remplacement partiel du ciment ou comme addition fine.

2. Justification du choix :

Ce projet vise à apporter une contribution à la valorisation du sédiment dans la composition d'un béton autoplacant (BAPs). Il s'agit donc d'optimiser le pourcentage de substitution en vase calcinée pour l'élaboration d'un éco-BAP qui doit répondre aux exigences **techniques, économiques et environnementales.**

II. Problématique des sédiments dragués :

1- Généralités sur les sédiments de dragage :

D'un point de vue géologique, les sédiments sont définis comme étant des matériaux fins, issus généralement de l'usure des roches, qui décantent sur le fond. Ces matériaux peuvent être caractérisés par leur : origine, nature minéralogique, constituants, et leur taille. Ils peuvent être d'origine naturelle ou anthropique :

- **Origine naturelle** : les particules peuvent être de nature endogène ou exogène :
 - Les particules endogènes (autochtones) : principalement constituées de M.O, généralement des organismes aquatiques animaux ou végétaux.
 - Les particules exogènes : des fragments minéraux venant de l'érosion éolienne ou hydrique des sols. Ils peuvent aussi être de caractère organique comme les abris et les feuilles d'arbres.
- **Origine anthropique** : peuvent être de nature organique ou minérale, proviennent essentiellement de l'activité humaine (industrielle, urbaine, et agricole).

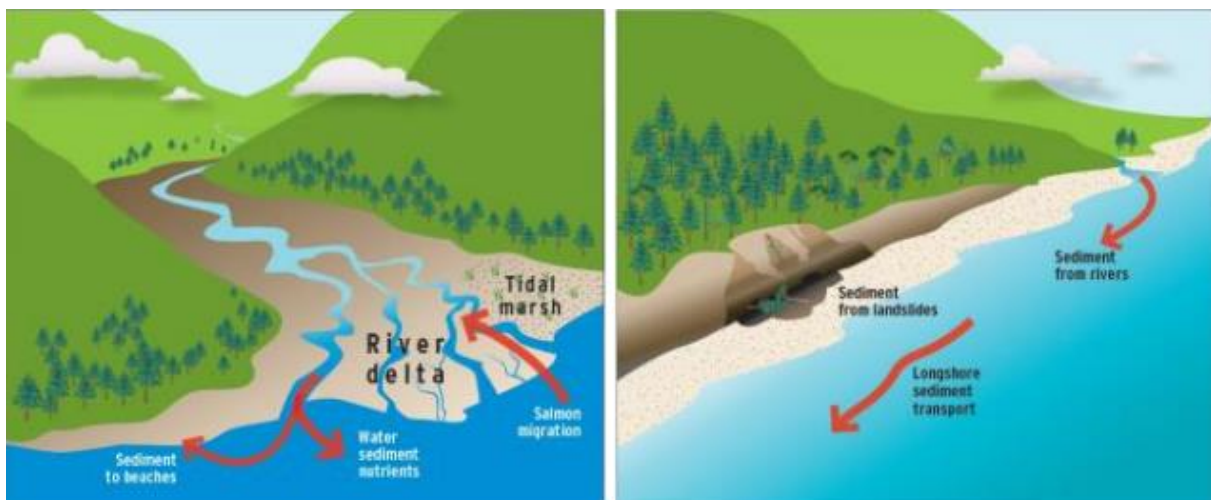


Figure -1- : Processus de transport des sédiments

2- Problématiques du dragage et de la gestion des sédiments :

Le dragage est une opération qui consiste à prélever les sédiments du fond des cours d'eau. On distingue trois types du dragage : d'approfondissement, d'aménagement de nouvelles aires portuaires, et d'entretien. Du fait des volumes dragués importants, et de la présence potentielle de contaminants dans les sédiments, une gestion adaptée de ces matériaux doit être mise en place. La gestion de ces matériaux varie d'un site à l'autre, notamment à la nature du site, le niveau de contamination, les volumes, et les contraintes techniques et environnementales. Entre plusieurs types de gestion, le rejet en eau et la mise en dépôt terrestre sont les options les plus privilégiées.

La problématique des sédiments de dragage est assez complexe et nécessite une analyse multi échelle : la conscience écologique, le respect de la réglementation, et le volet socio-économique.

III. Généralités sur les bétons autoplaçants (BAPs) :

Les BAPs (SCCs en anglais : Self-Compacting or Consolidating Concrete) représentent un axe de recherche avec un potentiel de développement économique et technique très fort et intéressant. Ils ont été utilisés au Japon pour la première fois dans les années 1980. Par définition, ils sont des bétons très fluides, stables et homogènes, ce qui caractérise leur rapidité de la mise en place sous leur poids propre sans vibration, et leur capacité à conserver leur homogénéité. Parmi les avantages des BAPs: la bonne qualité des parements avec moins de matériels, l'élimination de vibreur et nuisances sonores, la facilité de la mise en œuvre et la réduction de temps de travail. Le BAP doit avoir des propriétés rhéologiques permettant de remplir correctement les espaces avec une ségrégation minimale. Une ouvrabilité élevée et une bonne stabilité sont particulièrement requises pour les BAPs.

1- Caractéristiques des BAP à l'état frais :

Les BAPs sont principalement caractérisés par leurs propriétés à l'état frais ce qui rend leur caractérisation plus complexe par rapport aux bétons ordinaires. Les BAPs nécessitent des quantités énormes des additions dues au volume de pâte qui garantit leur ouvrabilité et fluidité. En pratique, il existe plusieurs variétés d'essais pour qualifier les BAPs tels que :

✓ **Essai d'écoulement : V-funnel :**

La capacité de l'écoulement est un paramètre important qui reflète la mobilité du BAP en milieu confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V. les dimensions de cet entonnoir varient tout dépend des normes utilisées (Figure 1-5) (conformément à EN 12350-9). L'essai de l'écoulement est toujours lié à l'essai de l'étalement, et au seuil de cisaillement du matériau. Le temps d'écoulement Vfunnel dépend du type d'application visée, qui est regroupé selon 2 classes :

- Classe VS1 / VF1 : $T500 \leq 2$ s et $V_{funnel} \leq 10$ s.
- Classe VS2 / VF2 : $T500 > 2$ s et V_{funnel} de 7 à 27 s.

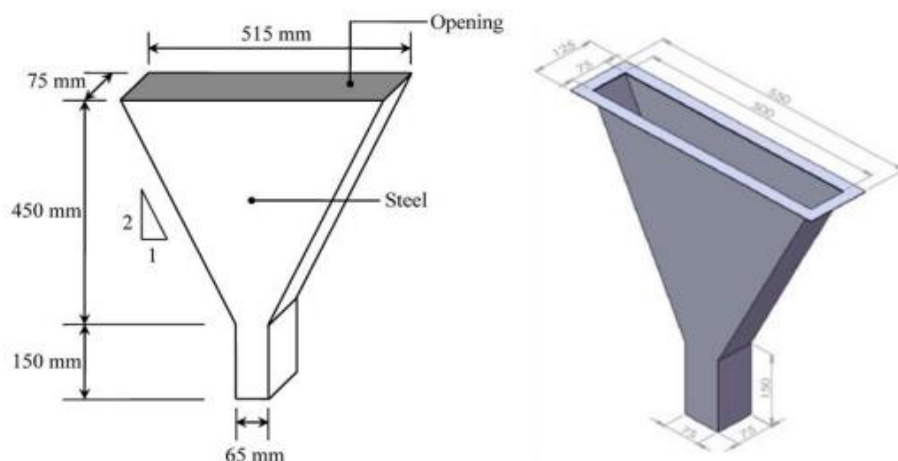


Figure -2- : Les dimensions du Vfunnel selon EN 12350-1

✓ **Essai de fluidité : l'étalement :**

L'essai de l'étalement et le T500, (ASTM C1611 conformément à EN 12350-8), permettent d'évaluer la fluidité et le débit du BAP en l'absence d'obstructions. Le test est basé sur l'essai d'affaissement par le cône d'Abrams. Il consiste à mesurer le diamètre d'étalement d'une galette de béton sur deux côtés perpendiculaires (Figure 1-6), ce qui donne une indication sur la capacité de remplissage. Le temps T500 est une mesure de la vitesse d'écoulement (et donc de la viscosité), il correspond au temps pour que la galette atteigne le diamètre de 50 cm. Les valeurs d'étalement d'un bon BAP sont entre 600 et 750 mm selon les recommandations du guide EFNARC : « European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products for Concrete ».

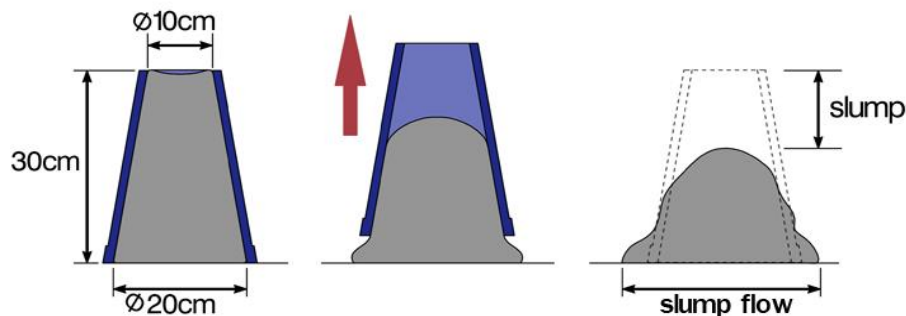


Figure -3- : L'essai de l'étalement au cône d'Abrams

✓ **Capacité de dépassement : la boîte en L :**

L'essai de la boîte en L (Figure 1-7) évalue la capacité de passage des BAPs à travers des ouvertures serrées, y compris des espaces entre les barres d'armature et d'autres obstructions sans ségrégation ou blocage. Il y a deux variantes, le test à deux et à trois barres. Le test à trois barres simule un renforcement plus congestionné (EN 12350-10). Le principe de l'essai consiste à remplir de béton en seule fois la partie verticale de la boîte, et après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers le ferrailage jusqu'à stabilité. Le résultat tiré de l'essai est de mesurer la différence de hauteur de béton dans les extrémités de la boîte. Pour valider la formulation du BAP, le taux de remplissage ($\Delta H = H_2/H_1$) doit être supérieur à 0,8 (Group, 2005).

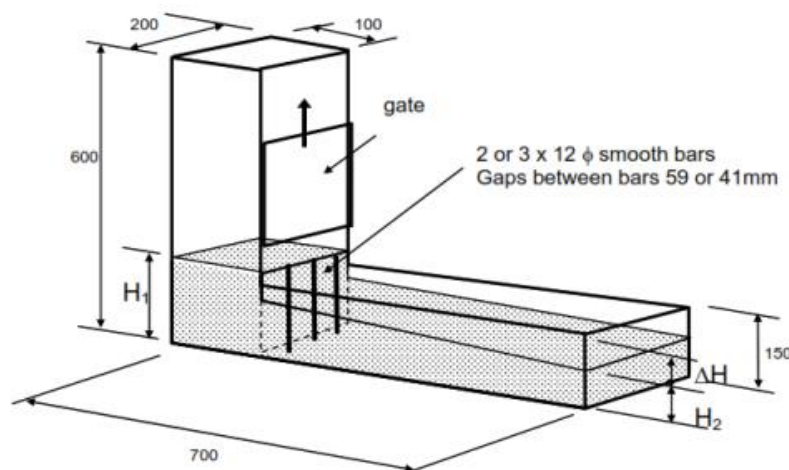


Figure -4- : L'essai de l'étalement au cône d'Abrams

✓ **Résistance à la ségrégation : stabilité au tamis :**

Cet essai consiste à évaluer les BAPs face au risque de ségrégation en quantifiant le pourcentage en masse de laitance (PLAINTANCE) d'un échantillon de BAP ($4,8 \pm 0,2$ kg) qui passe à travers un tamis de 5 mm, comme illustré à la Figure 1-9 (conformément à EN 12350-11). Les critères acceptables d'une formulation d'un BAP sont comme suite : ▪ $0 < \text{PLAINTANCE} < 15 \%$: stabilité satisfaisante ; ▪ $15 < \text{PLAINTANCE} < 30 \%$: stabilité critique ; ▪ $\text{PLAINTANCE} > 30 \%$: stabilité très mauvaise ; Selon ENFARC 2005, la PLAINTANCE pour un BAP acceptable doit être inférieure à 23 %.

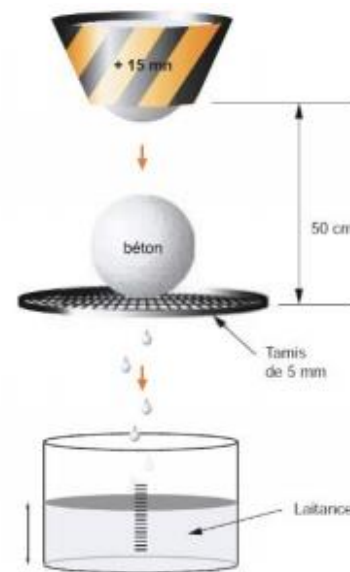


Figure -5- : L'essai de l'étalement au cône d'Abrams

2- Optimisation des sous-produits dans les BAPs :

Les additions les plus couramment utilisées sont les sous-produits industriels tels que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, et les fumées de silice. Ils peuvent être incorporés dans les bétons prêts à l'emploi ou mélangés avec du clinker pour produire des ciments composés. L'utilisation de sous-produits comme ajout cimentaire a fait l'objet de nombreuses études : poudre de marbre, granulats légers recyclés, poudre de verre, poudre de granit, calcaire, argile et pouzzolanes, cendres d'huile de palme, granules de caoutchouc, et sédiments, etc.

IV. Optimisation et valorisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité :

1- Protocole expérimental :

✓ **Préparation des échantillons et procédure d'essai :**

Quinze mélanges de mortiers autoplaçants ont été préparés. La quantité de ciment, les sédiments traités, le rapport sédiments/ciment (S/C) et le rapport eau/liant (E/L) ont variés de 300 à 500 kg/m³, 0 à 250 kg/m³, 0 à 0,5 et de 0,25 à 0,55, respectivement. La teneur en SP a été maintenue à 2 % de l'extrait sec par rapport à la masse de ciment pour tous les mélanges. Un plan expérimental a été établi pour un modèle des surfaces de réponses.

Après préparation des mélanges (EN 196-1), l'étalement du mini-cône d'Abrams (Dflow) et l'écoulement en utilisant le cône de Marsh (Tflow) ont été mesurés pour les pâtes. Des mélanges de mortier ont été préparés avec les mêmes formulations, avec du sable normalisé supplémentaire de 1350 kg/m³ (EN 196-1). Les propriétés de l'état durcies des échantillons

de mortier eu été déterminées à 7, 28, 60 et 90 jours. Pour chaque mélange, trois échantillons ont été réalisés.

✓ **Approche de conception de mélange :**

La conception du mélange est basée sur trois paramètres principaux. L'accent était mis sur le rapport eau-liant, le rapport sédiments-ciment et le rapport volume de liant-volume total.

La conception composite centrale utilisée est basée sur un modèle quadratique qui est modéliser par l'équation suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Où :

- y : la réponse matérielle.
- x_i, x_j : sont les valeurs codées des variables indépendantes E/L et S/C respectivement.
- I : le coefficient linéaire.
- J : est le coefficient quadratique.
- β : le coefficient de régression.
- k : le nombre de facteurs.
- ε : l'erreur résiduelle aléatoire.

2- Résultats et discussion :

✓ **Propriétés du BAPs à l'état frais :**

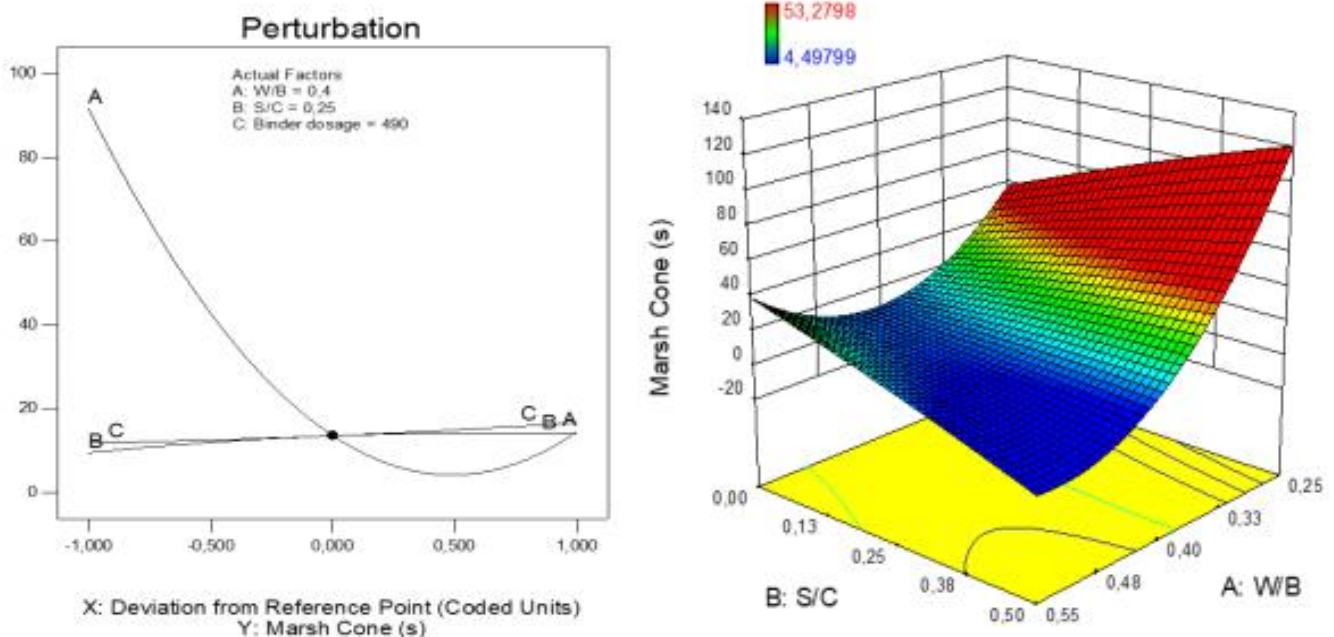


Figure -6- : Effets de : E / L et S / C sur le Técolement pour un dosage fixé du liant de 490 kg / m³

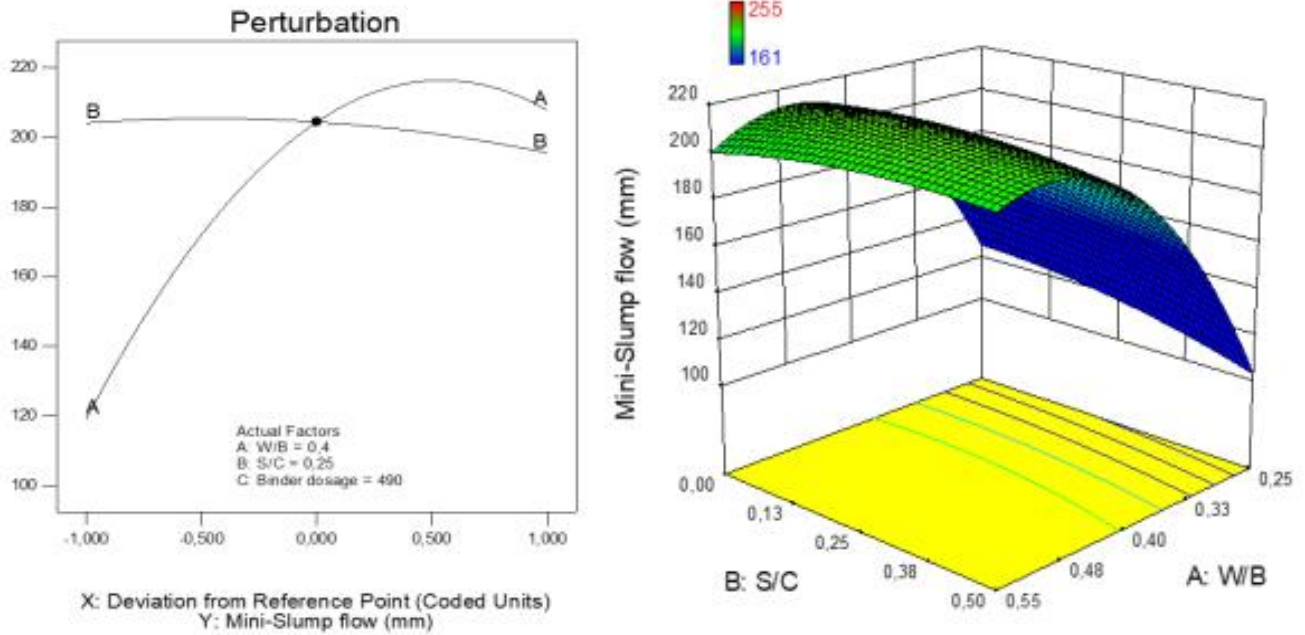


Figure -7- : Effets de : E/L et S/C sur l'étalement pour un dosage fixé du liant de 490 kg/m^3

Pour la fluidité, le temps de l'écoulement a varié de 4,5 à 53,3 secondes (figure-6-). Pour l'ouvrabilité (figure-7-), l'étalement variait de 161 à 255 mm. Les résultats ont montré que la fluidité et l'ouvrabilité augmentent avec le rapport E/L et vice-versa. Le rapport S/C a un effet négligeable sur l'état frais.

✓ Résistance mécanique :

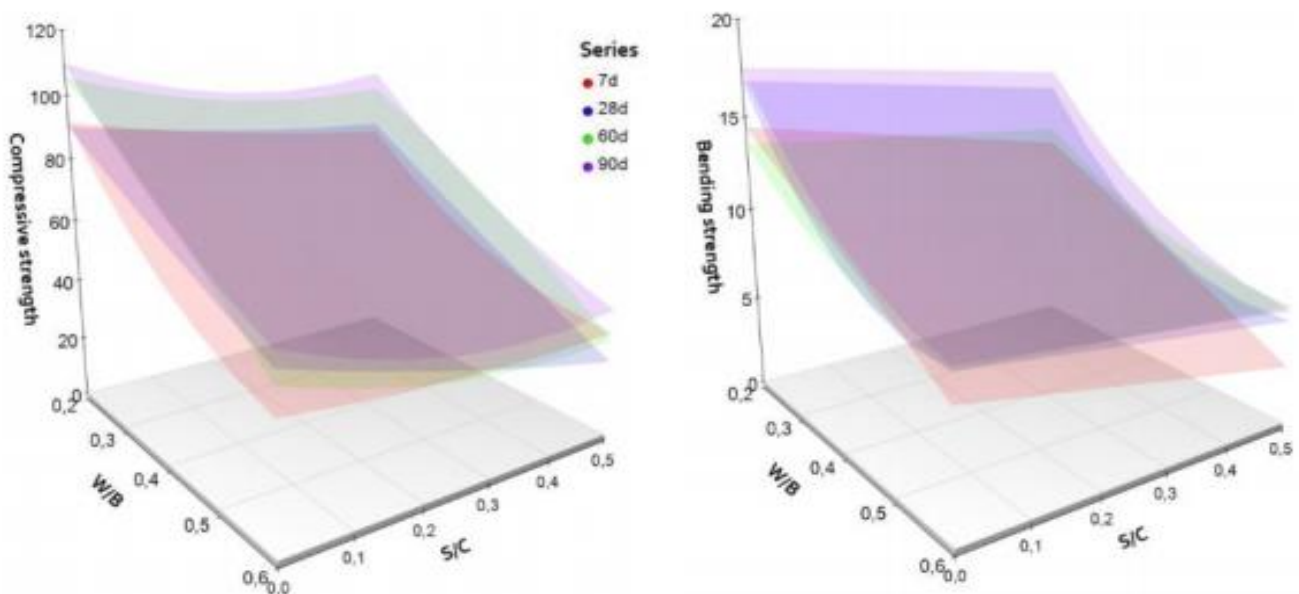


Figure -8- : Effets des variables du W/B et S/C sur la résistance à la compression et à la flexion

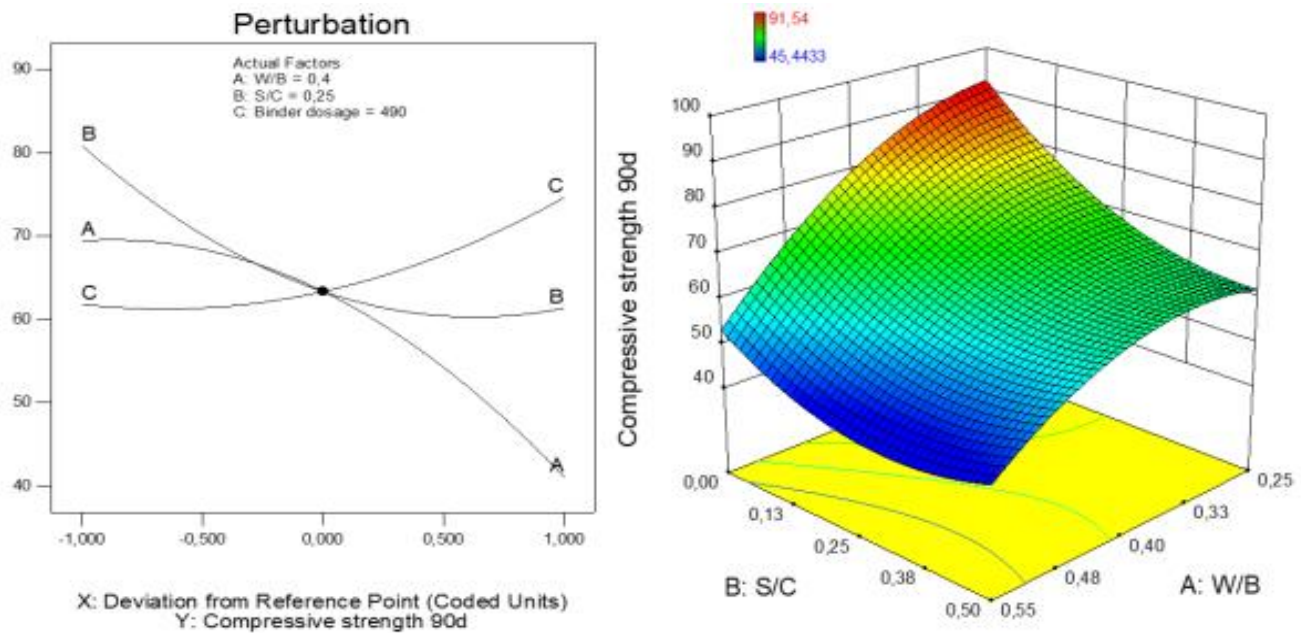


Figure -9- : Effets de différentes variables résistance à la compression à 90 jours

Les effets d'interaction des variables sur la résistance ont été étudiés. Les résultats indiquent que, pour un dosage moyen de 490 kg/m³, le taux d'incorporation des sédiments a un impact important sur la résistance à la compression : une variation de S/C de 0 à 0,5 est associée à une variation de résistance allant de 80 à 60 MPa. Cependant, le rapport E/L a également un effet important sur la résistance : une variation de 0,25 à 0,55 est associée à une variation de résistance de 70 à 40 MPa. Les effets d'interaction des variables sur la résistance à la flexion ont été étudiés aussi, et les résultats trouvés sont de la même tendance de la résistance à la compression.

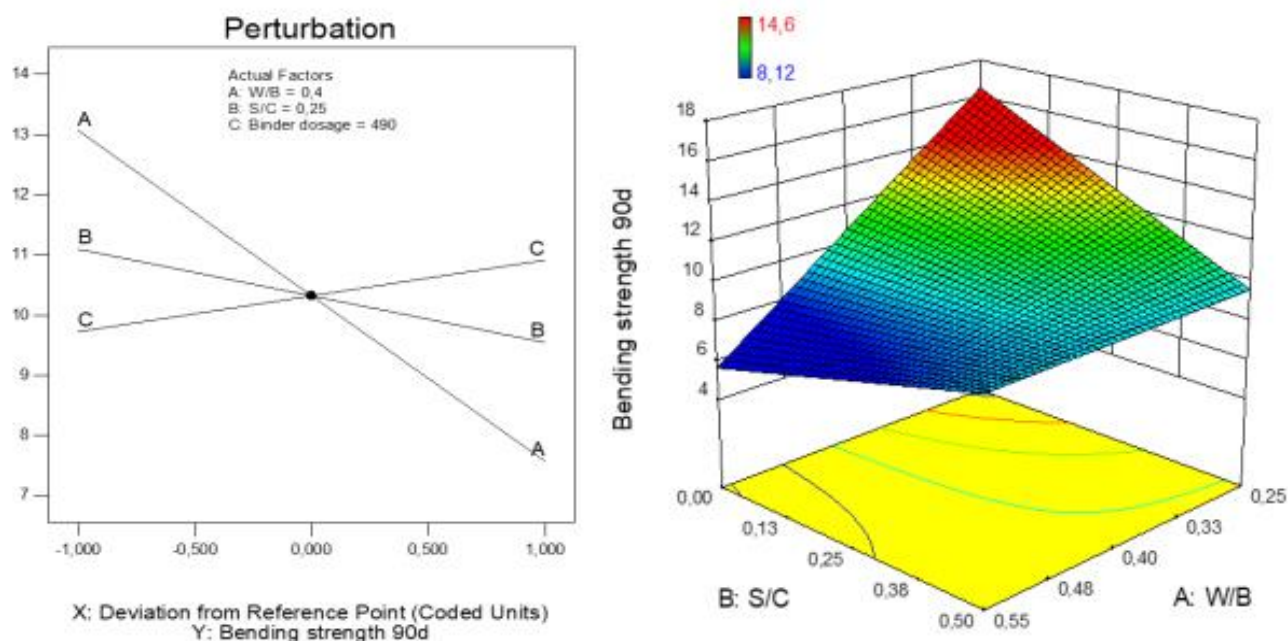


Figure-10- : Effets des variables sur la résistance à la flexion à 90jours

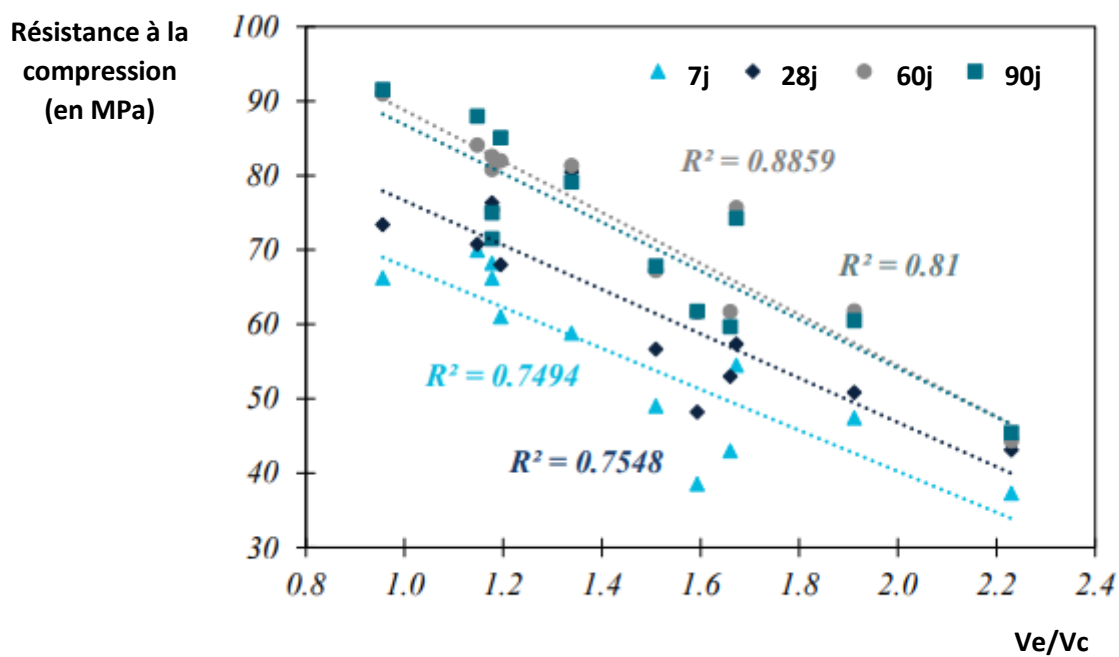


Figure-11- : Corrélation entre la résistance à la compression et le rapport V_e / V_c

Une forte corrélation entre la résistance à la compression à différents âges et le rapport volumique E/C a été remarquée. Ces résistances diminuent avec l'augmentation de ce rapport. L'incorporation de sédiments a réduit les résistances mécaniques, mais cette réduction reste acceptable, car le taux d'incorporation atteignait 50 %. Certains facteurs tels que la taille des particules peuvent avoir un impact direct sur la compacité, la porosité et les résistances mécaniques.

✓ **Optimisation du mélange et validation du modèle :**

Une optimisation a été faite afin de maximiser la quantité de sédiments incorporés avec une auto-compatibilité acceptable. Les résultats de l'optimisation ont montré que : le rapport S/C peut être utilisé jusqu'à 0,07 et 0,346 pour un dosage de liant de 380 et 600 kg/m³, et avec un rapport E/L égal à 0,316 et 0,337, respectivement.

Réponses et variables		Lower	Upper	Critères
E/L		0,25	0,55	<i>In range</i>
S/C		0	0,5	<i>Maximisé</i>
Fluidité Tflow (s)		4	40	<i>In range</i>
Ouvrabilité Dflow (mm)		170	190	<i>In range</i>
Résistance à la compression fc90j (MPa)	7 -ème j	60	70	<i>In range</i>
	28 -ème j	65	81	<i>In range</i>
	60 -ème j	70	91	<i>In range</i>
	90 -ème j	75	92	<i>In range</i>

Tableau : Optimisation de chaque variable et réponse à la maximisation du rapport S / C

Afin de valider ce modèle, une série d'expériences a été menée sur trois proportions de mélange optimales, afin d'évaluer la représentativité, la répétabilité et la reproductibilité du modèle. Le mélange optimal pour une quantité maximale de sédiments était celui avec une dose de liant allant jusqu'à 600 kg/m³, ce qui a permis l'incorporation de davantage de sédiments ($S/C = 0,346$ 2).

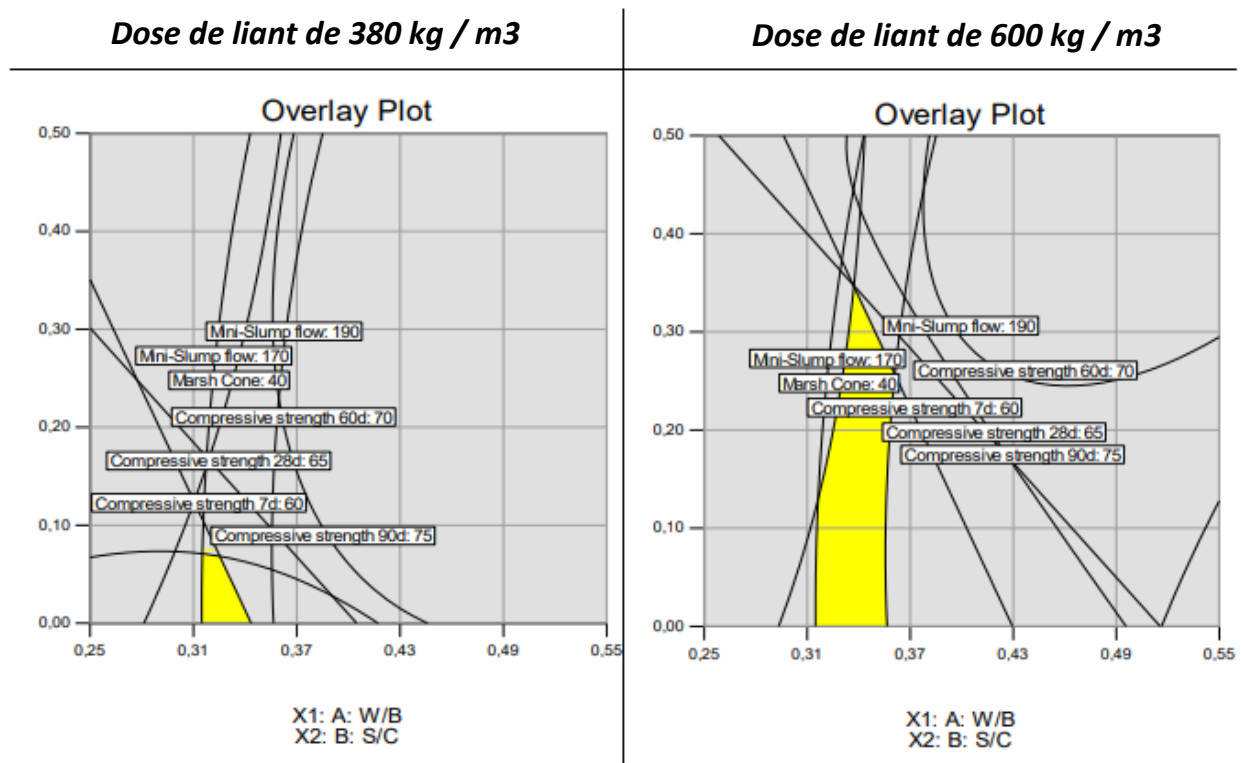


Figure -12- : Variation de la fonction de superposition pour l'optimisation multi-objectifs sur E / L et S / C

V. Application au Maroc :

1- Gouvernance du marché de sable au Maroc :

L'administration de tutelle considère qu'il est plus aisé d'assurer le suivi des sables de dragage et de concassage que celui provenant des dunes dont il est difficile d'identifier les producteurs en raison de la faible coordination des services de l'Etat en matière de contrôle. Parallèlement, le plan de 2008 préconise la promulgation d'une loi sur l'exploitation des carrières, interdisant l'exploitation des dunes côtières et intégrant l'extraction du granulat marin en tant que carrière sous-marine. Ce qui

favorise l'utilisation des sédiments marins dans la fabrication d'un Eco-béton autoplaçant qui répond aux exigences environnementales.

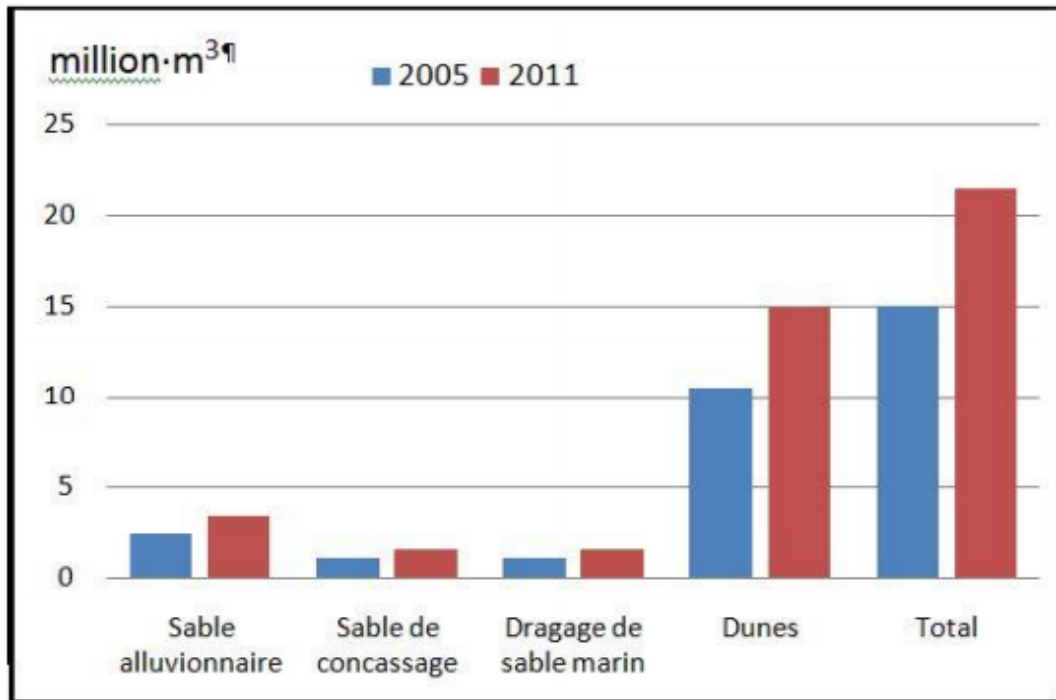


Figure -13- : Volumes de sable de construction produit en 2005 et 2011 (METL 2013, modifié).

2- Les projets d'optimisations vont avoir plus d'efficacité s'ils seront effectués par un bureau d'étude ou par une grande société ?

Les projets d'optimisation vont être bénéfiques pour le bureau d'étude. En fait, ce dernier vise une bonne optimisation de résistance selon les intempéries, le lieu d'installation, les matériaux et optimiser au maximum les efforts fournis. Donc l'intégration de cette technique (eco-BAPs) constitue un gain économique et environnemental.

3- Des perspectives pour un élargissement de ce sujet :

L'optimisation des sédiments dans les eco-BAPs constitue une étape de faisabilité qui est prometteuse. Cette filière "eco-BAPs" est plus que potentielle et des travaux pour optimiser la fabrication sont à poursuivre.

Enfin, on peut entrevoir que les sédiments de dragage peuvent constituer une source de matières premières locale très intéressante, notamment pour le secteur de la construction fort consommateur de granulats.

VI. Conclusion :

Les propriétés des bétons à base des sédiments correspondent à des **bétons structurants**. Ainsi, les sédiments peuvent être valorisés sur place par la mise en œuvre de **plates-formes multimodales**. Ces plates-formes serviront par la suite au stockage, au tri et à la valorisation des déchets, tels que les sédiments de dragage, les matériaux de démolition ou d'autres types de déchets transportés par voie navigable.

Des **usines de préfabrication** pourront aussi être implantées en bord d'eau. Cela faciliterait la valorisation des sédiments, en économisant le transport, tout en favorisant la distribution de ces produits industrialisés par voie fluviale. Toutes ces utilisations s'inscrivent dans une démarche d'économie circulaire.

Toutefois, avant toute utilisation de ces bétons, il est nécessaire de vérifier les propriétés de durabilité et l'impact environnemental de ces sédiments.

VII. Références :

Abd Elrahman, M., Hillemeier, B., 2014. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. *Constr. Build. Mater.* 58, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.024>

AFNOR, 2007. NF EN 15169 : Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments.

Aïssoun, B.M., 2015. Influence des caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants sur leur durabilité. Université de Sherbrooke.

Aïssoun, B.M., Hwang, S.-D., Khayat, K.H., 2016. Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. *Mater. Struct.* 49, 597–609. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0522-9>

Alsubari, B., Shafigh, P., Jumaat, M., 2015. Development of Self-Consolidating High Strength Concrete Incorporating Treated Palm Oil Fuel Ash. *Materials* 8, 2154–2173. <https://doi.org/10.3390/ma8052154>

Alyamac, K.E., Ghafari, E., Ince, R., 2017. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *J. Clean. Prod.* 144, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>

<https://www.paralia.fr/editions/index.php/revue/article/view/65>

<http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2016/09/Manuscrit%20BIS.ST.22-14%20v.%20finale.pdf>

https://www.researchgate.net/figure/V-funnel-apparatus_fig1_287109740

https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_d%E2%80%99affaïssement_au_c%C3%B4ne_d%E2%80%99Abrams